

別紙 1

## 論文の内容の要旨

論文題目	音速変化が伝搬路上に存在するときの ドブラシフト計算式とその応用に関する研究
申請者	田中 正吉

海洋における調査では、音波を利用した計測が多く行われており、その代表例がドブラ計測である。ドブラ効果を利用した水中音響機器において、ドブラシフトの計算に音速値が必要である。一般に、この音速は伝搬媒質中で一定値であると仮定し、トランスデューサ周囲の音速が使われる。しかし実際の海洋では、主に海水の温度、圧力、塩分濃度によって、音速が変化する。そのため、海域や季節にもよるが、海面の音速に対して、水深数百mの音速は1~2%程度遅くなる。このように伝搬媒質の音速が水深によって変化するにもかかわらず、一般には音速を一定値と仮定してドブラシフトを計算しており、その値から船速あるいは流速を測定すると、何らかの測定誤差が発生すると予想される。また、水中音響の伝搬路上には、例えば船舶が航行するときに船底に引きずられて、船と同じ方向に流れる伴流(ウェーキ)や、その他の海流等の伝搬媒質自身の流れが存在する。これらの流れは、実質的に音速を変化させると考えられるので、海流も何らかの計測精度に影響を与えることが懸念される。しかし、伝搬路上に存在する音速変化や、海流がドブラシフトの測定精度に与える影響について、統一的に考察された研究は見当たらない。そこで、本研究では、音速変化が存在する場合の、ドブラシフトの改善計算式の提案、さらに提案式の応用として、リモート水温計への適用についての検討を行った。

初めに、伝搬路上の音速と流速が場所によって変化する場合において、送波超音波パルスの時間幅の伸縮変化を基づき、ドブラシフト計算式を新たに導出した。求められた改善計算式から、流速がドブラシフトに与える影響は無視できること、また、音源周囲の音速と反射体周囲の音速のみが、ドブラシフトに影響を与えること等の結果を得た。また、改善計算式を使って、伝搬路上の音速を一定と仮定した従来ドブラ計算式の測定誤差は、音源周囲の音速に対する、反射体周囲の音速の比に逆比例することが示された。さらに、海

面に対してある俯角を与えながら超音波の送受信を行う、現行のドプラ装置における、深度方向の音速変化により発生する誤差について評価した。その結果、水深に対する伝搬媒質の音速分布が層構造であれば、測定誤差は発生しないことが示された。そして、1次元モデルから導いた改善計算式を、3次元モデルに拡張し、一般化されたドプラシフト改善計算式を示した。

次に、改善計算式の実証のため、ガラス水槽を使ったモデル実験を行った。水槽を中央で2分割し、一方の水槽にトランスデューサを固定、他方の水槽に移動する反射体を設置した。反射体として回転する歯車に取り付けた微小アルミニウム球を用いた。送波超音波は周波数約2 MHz、パルス幅0.2 ms、繰り返し周期10 msのトーンバースト信号とした。分割された各水槽の水温を変化させ音速を制御し、歯車の回転速度を変化させて反射体の移動速度を制御した。受信エコーからドプラシフト周波数を測定し、改善計算式によるドプラシフト理論値との比較を行った。実験結果は処理系の周波数分解能である、数十Hzオーダの差異で理論値と一致を示し、改善計算式の正当性が実証された。

最後に、改善計算式の応用として、超音波式リモート水温計の実現可能性について検討を行った。水中での音速は主に水温によって変化し、水温と音速の正確な関係(実験式)が既知である。導出された改善計算式の中には、反射体位置の音速が含まれている。したがって、改善計算式を使って、反射点位置の音速が測定されれば、実験式を逆算することによって水温を求めることができる。この考えの基に、水温の深度変化を遠隔にて測定する、超音波式リモート水温計を検討した。そこでは、移動反射体によって発生するドプラシフトを測定する超音波ドプラ流速計と、反射体の移動速度を独立して測定する相関流速計の併用を提案した。水温測定の目標測定精度を、1℃と仮定したとき、ドプラ流速計と相関流速計に求められる測定精度は約0.1%であることが示された。市販されている現行のドプラ流速計および相関流速計の仕様性能を調査し、測定精度0.1%が達成されている装置がそれぞれ存在することがわかった。これより、目標測定精度1℃のリモート水温計の実現性に関し、肯定的な結果が得られた。

以上より、本研究の成果として、音速変化が伝搬経路上に存在するときのドプラシフトの改善式を示し、その妥当性を示した。また、提案改善式を応用し、超音波式リモート水温計の実現可能性を示した。



## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 田中 正吉

審査委員主査 野村 英之

委員 張 熙

委員 稲葉 敬之

委員 羽田 陽一

委員 鎌倉 友男

一般に海洋におけるドプラ効果を利用した水中音響機器では、音速は媒質内で一定であると仮定されている。しかしながら、実際には、主として深さ方向に音速が変化することが知られており、海洋計測においてその影響が懸念される。本論文では、この海洋中の音速変化がドプラシフトに与える影響についての検討及び改善ドプラシフト計算式の提案、さらには、提案式を用いた超音波式リモート水温計の実現についての検討が行われた。

本論文は、次の6章から構成されており、第3-5章が申請者の行った研究である。第6章に全体の結論を述べている。

第1章「序論」では、本研究を進めるにあたり、海洋計測、主として音波を使ったドプラ計測法に関わる、先行技術の歴史的発展と現状、および課題を挙げている。さらに本研究の第1の目的は、音波の伝搬経路上の音速と流速が場所によって変化するときの、ドプラシフト計算式の導出、第2の目的は、導出されたドプラシフト計算式を応用した、超音波式リモート水温計の提案であることが述べられ、これらを達成するための過程を示している。

第2章「超音波ドプラ装置」では、現行のドプラ装置の計測原理を説明している。現行の装置では、伝搬路上の音速を一定と仮定した計算式が使われていることが述べられている。

第3章「改善計算式と測定誤差」では、送波超音波パルスの伝搬における、パルス時間幅の伸縮変化を基に、音速と流速が、伝搬路上で変化するときのドプラシフト計算式を新たに導出している。導出された改善計算式から、流速の影響は無視できること、音波の伝搬路上に音速変化が存在しても、音源周囲の音速と反射体周囲の音速のみが、ドプラシフトに影響を与えること等の結論を得ている。また、伝搬路上の音速を一定と仮定する従来計算

式において、得られる反射体の移動速度の相対誤差は、音源周囲の音速に対する、反射体周囲の音速の比に逆比例することが示される。また、現行のドブラ装置における、深度方向の音速変化により発生する誤差は、水深に対する伝搬媒質の音速分布が層構造であれば、発生しないことが示されている。

第4章「実証実験」では、改善ドブラシフト計算式の検証のために実施した、モデル実験が説明されている。2分割した水槽の一方にトランスデューサを固定し、他方に移動する反射体を設置している。超音波は周波数約2 MHz、パルス幅0.2 ms、繰り返し周期10 msのトーンバースト信号としている。反射体として、回転する歯車に取り付けた微小アルミニウム球の鎖が用いられている。分割されたそれぞれの水槽の水温を変化させ音速を制御し、歯車の回転速度を変化させ反射体の移動速度を制御している。受波エコー信号から、ドブラシフト周波数を測定し、改善計算式による理論値との比較が行われている。実験結果は、処理系の周波数分解能である数十Hzオーダの差異で理論値と一致を示し、改善計算式の妥当性が示されている。

第5章「改善計算式の応用」では、改善計算式の応用として、超音波式リモート水温計実現への応用の検討が行われている。改善計算式を使って、反射点の音速が測定できれば、実験式を逆算することによって、水温を求めることができる。この考えの基に、水温の深度変化を遠隔にて測定する、超音波式リモート水温計の実現性が考察されている。超音波ドブラ流速計と、反射体の移動速度を測定する相関流速計の併用が提案されている。市販のドブラ流速計、および相関流速計の仕様性能調査から、目標測定精度1℃のリモート水温計の実現性に関し、肯定的な結果が示されている。

第6章「結論」では、本論文の成果をまとめ、あわせて今後の課題が述べられている。

以上より、本論文は海洋ドブラ計測における、伝搬路上の音速変化の影響の検討、さらにその応用技術の提案という目的を十分に達成している。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。